

SDSS J142225.03+535901.7宽吸收线多历元 光谱光变分析*

何东旭 何志成[†] 刘桂林[‡] 方文娟 沈璐 朱丹蕾 陈雅琪 段斌

(中国科学技术大学物理学院天文学系 合肥 230026)

摘要 类星体中的宽吸收线(broad absorption line, BAL)是外流存在的最强观测证据之一. BAL普遍存在光变现象, 分析BAL光变有助于限制外流的物理模型. 来自类星体中心引擎的沿视线方向入射的电离连续谱的变化是导致大多数BAL光变的主要机制. 如果一个类星体的BAL吸收坑在不同速度处同时存在一个方向的变化(变弱或变强), 那么它的BAL光变很可能主要由电离连续谱的变化导致. 类星体SDSS J142225.03+535901.7具有55个历元高信噪比光谱观测, 其BAL存在光变现象. 该源BAL的不同速度组分的等值宽度与连续谱光度之间均存在显著的负相关性(Spearman相关性检验, 不相关概率 p 值小于0.05). 而各组分的等值宽度与连续谱谱指数之间无显著负相关性可以排除等值宽度与连续谱光度之间的负相关性是由视线上含尘埃气体在垂直于视线方向上运动引起的这一可能. 因此, 该源的BAL光变主要由电离连续谱的变化导致.

关键词 星系: 活动, 星际介质: 喷流和外流, 类星体: 吸收线, 谱线: 轮廓

中图分类号 P158; **文献标识码**: A

1 引言

一般认为超大质量黑洞与其宿主星系是共同演化的, 主要依据如下: (1)超大质量黑洞的质量与其宿主星系的性质, 如光度、恒星的速度弥散等之间有一定的相关性, 其中最显著的是超大质量黑洞的质量与宿主星系中恒星的速度弥散之间的相关性, 即 $M_{\text{BH}}-\sigma$ 关系^[1]; (2)黑洞生长和恒星形成在宇宙历史上高度同步^[2]. 然而黑洞与其宿主星系无论是在空间尺度还是质量上都相差好几个数量级, 这暗示它们之间应当存在某种联系. 此外, 观测发现

大质量星系的数量远远少于没有活动星系核反馈的星系演化模型的预测^[3], 这促使天文学家考虑引入活动星系核的反馈机制.

活动星系核驱动的外流可能是这种反馈机制的重要形式之一. 外流存在的最强观测证据(之一)是类星体(quasi-stellar object, QSO)光谱中的宽吸收线(broad absorption line, BAL). 常见的BAL有: C IV、Si IV、N V、O VI、Mg II等. 一般认为BAL属于本征吸收系统, 蓝移的吸收线宽度可高达数万千米每秒, 这意味着宿主星系内的物质以0.1倍光速朝观察者运动. BAL的一些性质(如吸收坑的

2023-10-18收到原稿, 2023-12-04收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12273036、12222304、12192220、12192221), 中国载人航天工程(CMS-CSST-2021-A06、CMS-CSST-2021-A07), 中国科学技术大学基金项目(WK3440000005), 上海天文台横向经费(EF2030220007)资助

[†]zcho@ustc.edu.cn

[‡]glliu@ustc.edu.cn

等值宽度EW, 最大速度 V_{\max})和QSO的某些物理性质(如光度)有一定的相关性^[4-6]. 因此, 一般认为BAL是由活动星系核驱动的外流产生的吸收现象, 只有活动星系核才能驱动速度量级达0.1倍光速的外流.

BAL普遍存在光变现象. 在Capellupo等人的研究中, 短期内(时间间隔4-9个月)有39%的QSO发生了光变, 长期内(时间间隔3.8-7.7 yr)有65%的QSO有光变现象^[7]. 光变的典型时标为数月到数年^[8-13], 但也有文献表明几天内就发生明显光变的现象并不是特别罕见^[14]. 光变的幅度可以相当大, 极端情况下, 吸收坑会完全消失^[8]. 研究表明, 产生BAL的气体可能分布在距离星系中心从亚pc尺度到kpc尺度之间的任何位置^[15-22].

活动星系核驱动的外流具有巨大的能量, 可能对星系演化产生重要的影响(影响的大小取决于外流本身的尺度、质量、能量、相互作用程度等). BAL光变可作为研究外流的一个探针. 确认光变机制是利用光变限制外流物理模型的前提. 目前学界普遍认为, 产生BAL光变的可能原因主要包括:

(1)沿视线方向入射的电离连续谱的变化导致吸收体电离状态发生改变;

(2)吸收体的运动, 即移入/移出视线导致覆盖因子发生改变.

有研究表明, 吸收体自身电离状态的改变也会导致覆盖因子发生改变^[23], 因此, (1)和(2)可能是不完全独立的. 另外, (1)和(2)可能同时在光变中起到作用.

由于缺乏大样本, 系统地研究光变的主要机制在近十几年才逐渐开展. Gibson等人对由13个红移 $1.7 \leq z \leq 2.8$ 在3-6 yr间(rest-frame)有2次观测的源构成的小样本进行研究并未发现吸收坑光变与连续谱之间存在明显的相关性^[24]. Filiz Ak等人研究了来自斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)的291个源构成的较大样本, 发现BAL的等值宽度的变化 ΔEW 与光度有一定的相关性^[9], 这说明BAL光变可能是由电离连续谱的变化导致的(尽管他本人不认为

为这是很强的证据). Wang等人使用包含452个源的大样本以 14.1σ 的置信度确认BAL光变与连续谱1400 Å处的流量变化有相关性, 还发现同一个BAL吸收坑里不同速度组分或者不同BAL吸收坑里相同速度组分的光变具有一致的变化趋势^[12]. 这印证了BAL光变是由电离连续谱的变化主导^[25-27]. 与此同时也有天文学家认为覆盖因子的变化才是导致BAL光变的主要原因^[28-29]. 直到2017年He等人用选自SDSS的包含2005个源的超大样本得出至少80%源的BAL光变由电离连续谱的变化导致^[30]才初步结束争议. 但是对于某个源来说, 电离状态的变化与覆盖因子的变化可能都在其光变中发挥着作用^[31].

He等^[30]提出一个观点: 如果一个QSO的BAL吸收坑在不同速度处同时存在变化, 则其光变主要由电离连续谱的变化导致. 他们还给出了一个从SDSS的BAL QSO样本中选出的小样本, 由46个吸收坑在不同速度处同时存在光变的源组成^[32].

本文从其中选取一个具有55个历元高信噪比光谱观测记录的源, 拟合其连续谱和发射线, 计算其BAL吸收坑不同速度组分的等值宽度, 进而分析等值宽度与连续谱光度及谱指数之间的关系, 研究其BAL光变是否是由电离连续谱的变化所导致. 在第2节中, 我们详细地介绍了数据处理的步骤; 在第3节中, 我们对结果进行了分析和讨论; 第4节, 是总结与展望.

2 数据处理

2.1 选择目标

He等^[32]合并了Shen等人发布的SDSS DR7 (Data Release 7) BAL QSO样本^[33]和Paris等人发布的SDSS DR12 BAL QSO样本^[34], 去除了其中重复的数据, 再按照以下条件进行筛选:

(1)在SDSS DR16光谱数据库中有3次及以上观测;

(2)红移 $1.9 < z < 4.7$ (为了覆盖C IV $\lambda\lambda 1548, 1551$ 吸收线以便研究其光变情况);

(3)至少有一条光谱的g波段信噪比(signal to

noise ratio, S/N)大于10 (为了保证能探测到吸收线的信号);

(4)在低速(0–5000 km/s)、中速(5000–10000 km/s)和高速(> 10000 km/s) 3个区间内同时探测到BAL光变.

最终得到了一个由46个具有3历元以上高信噪比光谱观测记录的QSO组成的样本. 这个样本中QSO的BAL光变被认为是由电离连续谱的变化导致. 综合考量信噪比更高和具有更多历元观测记录这两个条件, 我们最终选定SDSS J142225.03+535901.7作为研究对象, 分析其BAL光变的原因.

SDSS J142225.03+535901.7有55个历元BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey)观测记录, 信噪比全部大于18, 红移 $z = 2.69$, 赤经RA = 215.6043, 赤纬Dec = 53.9838. 附录表1第1–4列列出了它的55个历元光谱观测的光纤插接板号Plate、简化儒略日期MJD、光纤号FiberID和信噪比S/N信息. 第5–22列中奇数列分别为连续谱谱指数 α , 1700 Å处连续谱谱流量密度 f_{1700}^{con} , C IV发射线的线心波长 μ , 发射线的速度弥散 ς , 发射线强度A, C IV吸收坑中低速组分的等值宽度 EW_{low} , 中速组分的等值宽度 EW_{mid} , 高速组分的等值宽度 EW_{high} 和整个吸收坑的等值宽度 EW_{whl} , 偶数列为其对应的误差. 该源的特殊之处在于其吸收在低速区间比较浅, 高速区间则相对较深, 与一般的样本统计结果刚好相反(一般的BAL QSO其吸收坑在低速区间比较深, 高速区间相对较浅^[32, 35]). 所以很有必要研究该源的BAL光变机制是否存在特殊之处.

2.2 拟合光谱

在取得目标源SDSS J142225.03+535901.7的光谱数据后, 首先进行红移改正和银河系消光改正(这里使用的是文献[36]中给出的参数). 由于存在强烈的吸收特征, 寻找适当的窗口(既无发射线也无吸收线)进行连续谱拟合变得困难. 为此, 对原始光谱使用3 Å宽度的高斯核进行卷积. 基于平滑处

理后的光谱, 我们选择1355–1370 Å、1580–1595 Å、1705–1725 Å作为连续谱拟合的窗口. 图1的横轴为波长 λ , 纵轴为经银河系消光改正后的谱流量密度 f_{λ} , 图中灰色线条为该源的55个历元中的6条经过改正后的光谱. 除最底下的那条外其余每条向上递进偏移6个单位长度. 3个拟合窗口于图中以阴影区域标示. 光谱的蓝端1300–1400 Å处有吸收坑的特征, 导致此范围内的本征连续谱很难确定. 这对连续谱的拟合会造成一定影响. 我们在拟合时结合目视调整, 使拟合的连续谱整体看起来适中.

我们使用单幂律函数

$$f_{\lambda}^{\text{con}} = f_{1700}^{\text{con}} \left(\frac{\lambda}{1700 \text{ Å}} \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

拟合连续谱. 式中 λ 为波长, f_{1700}^{con} 是波长1700 Å处的连续谱谱流量密度, α 为谱指数, f_{λ}^{con} 是连续谱谱流量密度的拟合值. 通过

$$\chi^2 = \sum_i \left[\frac{f_i^{\text{obv}} - f_i^{\text{con}}}{\sigma(f_i^{\text{obv}})} \right]^2, \quad (2)$$

最小化得到拟合结果. 式中 i 为与波长相应的各个数据点, f_i^{obv} 是经银河系消光改正后的谱流量密度, f_i^{con} 是对应于 f_i^{obv} 的连续谱拟合值, $\sigma(f_i^{\text{obv}})$ 是 f_i^{obv} 的误差. 进行拟合前, 需要检查窗口范围内数据点的误差, 排除错误的和误差比较大的数据点, 即选用ivar (inverse variance)大于2的数据点. 每次拟合之后都遮盖掉测量值与拟合值差的绝对值大于3倍误差的数据点, 然后再次进行拟合, 直到结果不再变化. 个别在批处理过程中没有得到较好拟合的光谱手动调整其拟合参数. 拟合得到的谱指数 α 和1700 Å处的连续谱谱流量密度 f_{1700}^{con} 及它们的误差列入附录表1中供查阅(第5–8列). 图2为连续谱和C IV发射线拟合示例图. 图2中黑色线条为连续谱(上图)和C IV发射线(下图)的拟合值, 黑色竖直虚线指示C IV $\lambda 1550$ 发射线的位置, 拟合窗口由灰色短横线指出.

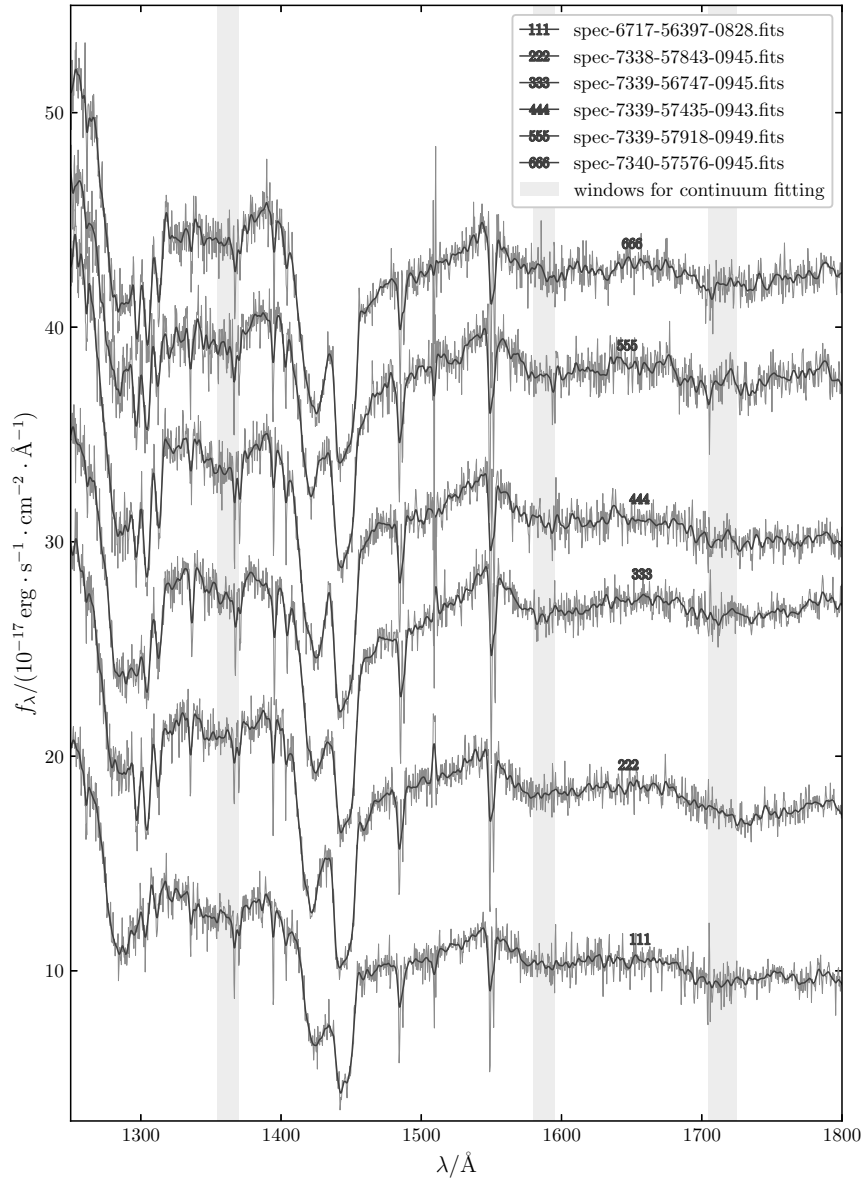


图 1 SDSS J142225.03+535901.7 的 55 个历元中的 6 条原始的及平滑处理后的光谱. 除最底下的那条外其余每条向上递进偏移 6 个单位长度. 阴影区域标示的是拟合连续谱所用的 3 个窗口. 1300–1400 Å 间有吸收特征, 导致此范围内的本征连续谱很难确定. 拟合结果需经过目视确认.

Fig. 1 The 6 original and smoothed spectra from 55 epochs of SDSS J142225.03+535901.7. Except for the bottommost line, each line is vertically offset by six units. The shaded area denotes the three windows used for fitting the continuum spectrum. Absorption features are present in 1300–1400 Å, making it challenging to ascertain the intrinsic continuum spectrum within this range. The fitting results require visual confirmation.

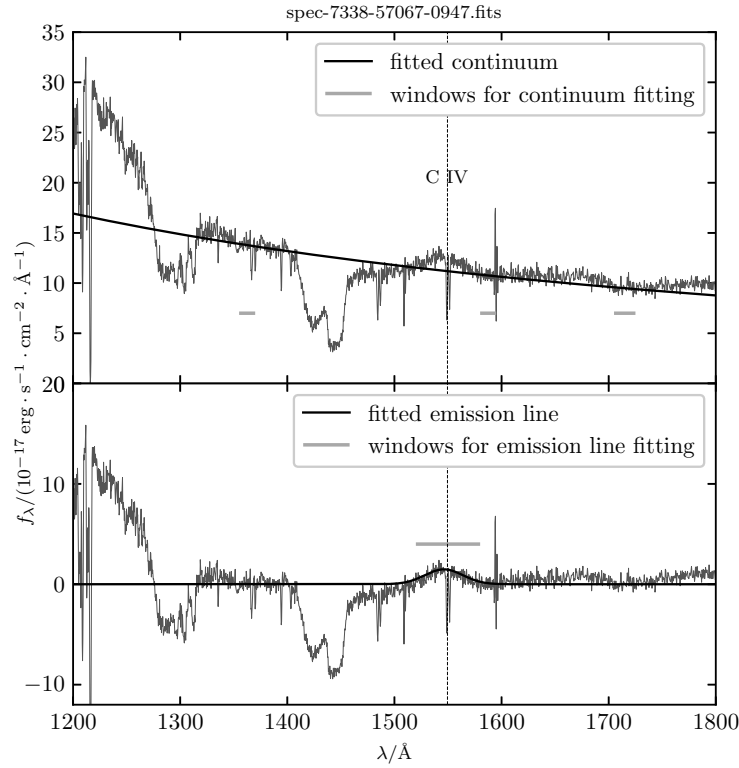


图2 SDSS J142225.03+535901.7的55个历元中的一条光谱的连续谱和C IV发射线拟合示例. 下图中的光谱为减掉连续谱拟合值的残差谱.

Fig. 2 An example of power-law continuum fitting and C IV emission line fitting for one spectrum from the 55 epochs of SDSS J142225.03+535901.7. The spectrum in the bottom panel represents the residual spectrum obtained by subtracting the fitted continuum values.

拟合可以通过调用mpfit程序¹简单实现, mpfit程序不仅会返回拟合的参数, 也会返回它们的误差 $\sigma(\alpha)$ 和 $\sigma(f_{1700}^{\text{con}})$. 连续谱拟合值的误差如下计算:

$$\sigma(f_{\lambda}^{\text{con}}) = f_{\lambda}^{\text{con}} \sqrt{\left[\frac{\sigma(f_{1700}^{\text{con}})}{f_{1700}^{\text{con}}} \right]^2 + 2 \ln \left(\frac{\lambda}{1700 \text{ Å}} \right) \sigma(\alpha)^2}. \quad (3)$$

接下来在扣除连续谱之后的残差谱上进行发射线拟合. 发射线使用如下的单高斯函数

$$f_{\lambda}^{\text{emi}} = A e^{-\frac{(\lambda - \mu)^2}{2\varsigma^2}}, \quad (4)$$

即可较好地拟合, 见图2 (下图). 式中 f_{λ}^{emi} 为发射线拟合值. 我们选用的C IV发射线拟合窗口为1520–1580 Å, 在图中以灰色横线指示. 考虑到该区间

内有吸收坑, 所以每次拟合之后都遮盖掉测量值低于拟合值3倍误差以上的数据点然后再次进行拟合, 直到拟合结果不再变化. 同样地拟合前排除 $\text{ivar} < 2$ 的数据点. 拟合得到的参数 μ 为C IV发射线的线心波长, ς 为发射线的速度弥散, A 为发射线强度. μ 、 ς 、 A 及其误差分别列入附录表1中供查阅(第9–14列).

图3为C IV吸收坑两历元光谱光变示意图. 在进一步扣除掉发射线的残差谱上可以看到一个分布范围很广的C IV吸收坑, 且有不同速度的多组分吸收特征. 根据吸收坑的图像, 我们将BAL吸收坑划分为3个部分, 即1405–1460 Å、1460–1520 Å和1520–1560 Å, 对应高速组分(18000–27700 km/s)、中速组分(5400–18000 km/s)和低速组分(0–5400 km/s), 在图中以不同灰度区分, 分别计算等值宽度.

¹<https://github.com/segasai/astrolibpy/blob/master/mpfit/mpfit.py>

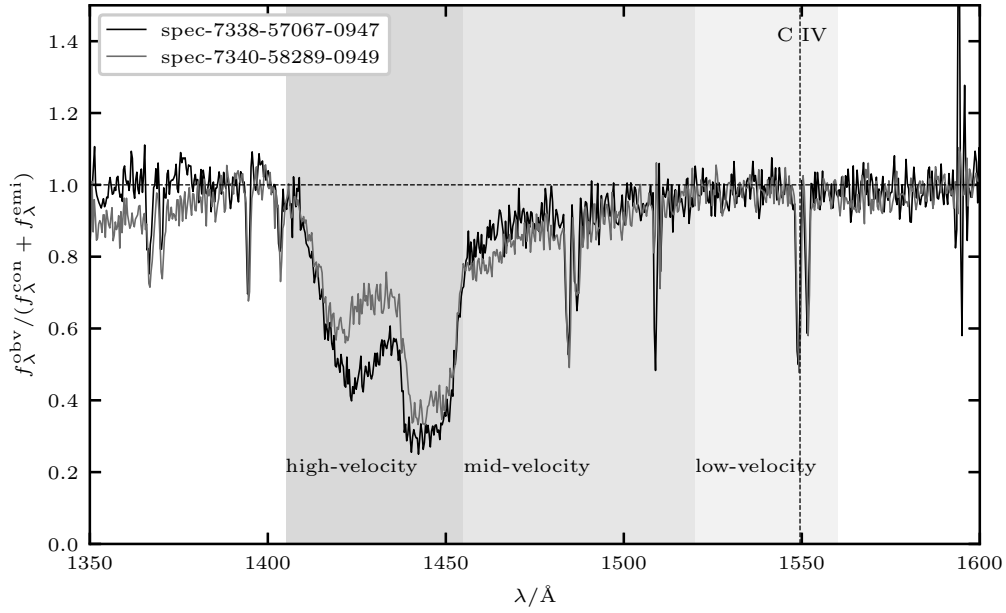


图3 SDSS J142225.03+535901.7的两条光谱的C IV吸收坑对比图. 黑色横虚线指示归一化因子等于1的位置. 一个巨大的吸收坑从1400 Å附近一直延伸至1550 Å附近.

Fig. 3 Comparison of the C IV absorption troughs between two spectra of SDSS J142225.03+535901.7. The black horizontal dashed line indicates the position where the normalization factor equals 1. A prominent absorption trough extends from around 1400 Å to near 1550 Å.

BAL吸收坑的等值宽度

$$EW = \int \left(1 - \frac{f_{\lambda}^{\text{obv}}}{f_{\lambda}^{\text{con}} + f_{\lambda}^{\text{emi}}} \right) d\lambda, \quad (5)$$

吸收坑不同速度组分的等值宽度 EW_{low} 、 EW_{mid} 、 EW_{high} 及整体的等值宽度 EW_{whl} 和它们的误差分别列入附录表1中供查阅(第15–22列).

等值宽度的误差

$$\sigma(EW) = \sqrt{\sum \left(\frac{f_i^{\text{obv}}}{f_i^{\text{con}} + f_i^{\text{emi}}} \right)^2 \left\{ \left[\frac{\sigma(f_i^{\text{obv}})}{f_i^{\text{obv}}} \right]^2 + \frac{\sigma^2(f_i^{\text{con}}) + \sigma^2(f_i^{\text{emi}})}{(f_i^{\text{con}} + f_i^{\text{emi}})^2} \right\} \Delta\lambda^2}. \quad (6)$$

3 分析与讨论

3.1 宽吸收线吸收坑等值宽度与连续谱光度的关系

如果BAL光变是由电离连续谱的变化导致, 那么BAL吸收坑的等值宽度应当与连续谱光度

之间存在相关性. 在这里, 我们用1700 Å处的连续谱谱流量密度 f_{1700}^{con} 来表征连续谱光度. SDSS J142225.03+535901.7的BAL吸收坑的3个速度组分以及整体的等值宽度EW与1700 Å处的连续谱谱流量密度 f_{1700}^{con} 之间的关系如图4所示. 图中每个点代表一个历元的观测, Spearman相关系数 r 及其 p 值标注在每个子图上. 可以看到低速组分的等值宽度EW与连续谱谱流量密度 f_{1700}^{con} 之间存在显著的负相关性, Spearman 相关系数 $r = -0.563$, $p = 7.7 \times 10^{-6}$. 中速和高速组分的等值宽度EW与连续谱谱流量密度 f_{1700}^{con} 之间存在中等强度的负相关性, 它们的 p 值均小于0.05. 如果连续谱的拟合值偏高, 即比本征值大, 则测得的BAL等值宽度偏大. 反之如果连续谱拟合值偏低, 则等值宽度偏小. 这种连续谱拟合的不确定性会减弱观测到的连续谱光度和BAL等值宽度之间的负相关性. 从这个角度来看, 连续谱光度和BAL等值宽度之间本征的负相关性应该更强. 以上结果表明该源的BAL光变很可能是由电离连续谱的变化导致.

SDSS J142225.03+535901.7是从光变被认为是由电离连续谱变化导致的QSO样本中挑选出来的. 这印证了前面所述的挑选样本方法的正确性.

图5是使用Cloudy软件^[37]模拟得到的Si IV、C IV柱密度随着电离参数的变化曲线. 模拟显示C IV柱密度随着电离参数 U 的增加先增加后减小^[9, 30]. 电离参数

$$U = \frac{Q_H}{4\pi R^2 n_H c}, \quad (7)$$

其中 Q_H 是中心源发射电离光子的速率, R 为吸收体

到辐射源的距离, n_H 为氢的数密度, c 为光速. 电离参数 U 较小时, 电离气体(如C IV)处于电离不足状态, 其柱密度会随着电离参数的增大而增大, 即吸收坑的等值宽度随着连续辐射的增强而增大. 当连续辐射强到一定程度, 电离气体的柱密度会达到最大值. 此时若连续辐射强度继续增加, 电离气体的柱密度反而会减小. 这是因为一部分电离气体已经处于更高的电离态(如C V), 称为过电离状态. 图4中, 各组分在连续辐射增强时等值宽度均减小, 这表明各组分的气体均处于过电离状态. 其他研究之前也得到过类似的结果^[14, 38-39].

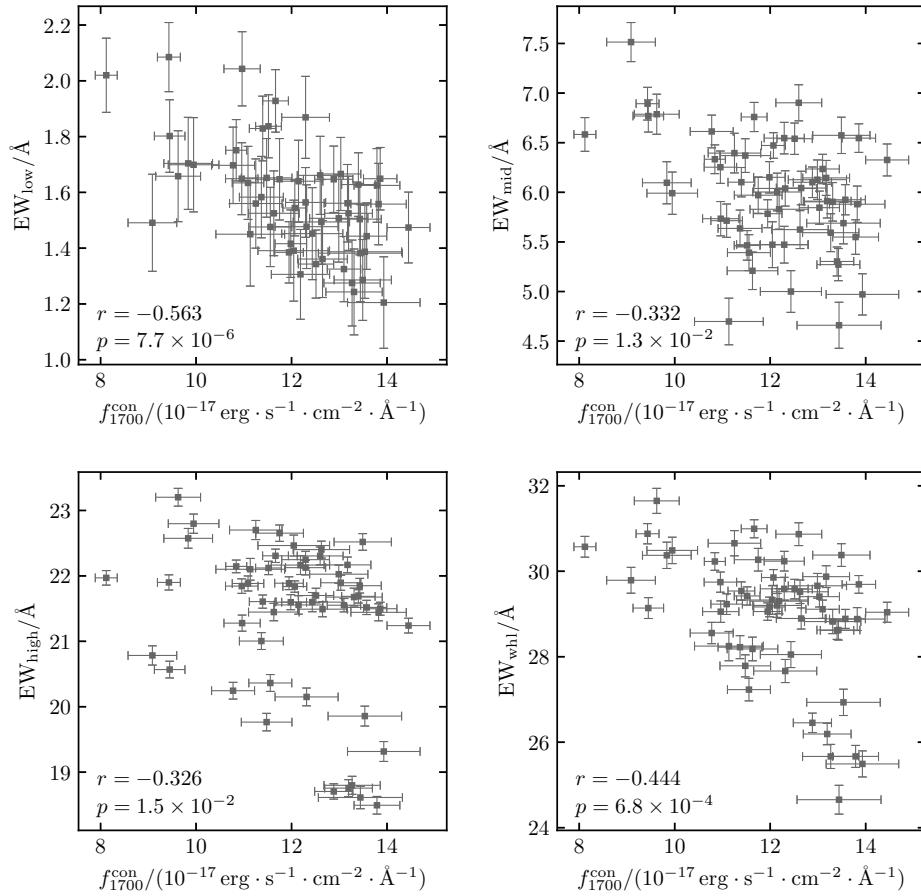


图4 吸收坑的3个速度组分及整体的等值宽度与1700 Å处连续谱谱流量密度之间的关系. Spearman相关系数 r 及其 p 值标注在每个子图上.

Fig. 4 The EW of 3 different velocity components of the absorption trough, as well as the whole trough, versus the spectral flux density at 1700 Å. Spearman's rank correlation coefficients and their corresponding p -values are annotated on each subplot.

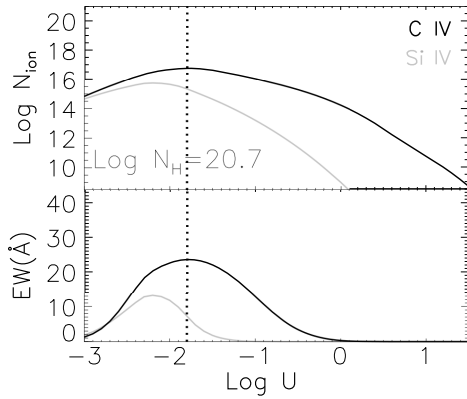


图 5 上图: Si IV、C IV 柱密度随电离参数 U 的变化(使用 Cloudy version c13.03 模拟得到, 模拟使用的氢的柱密度 $N_H = 10^{20.7} \text{ cm}^{-2}$). 下图: 吸收坑的等值宽度 EW 随电离参数 U 的变化(假设 BAL 吸收坑的光深分布呈高斯型, 半峰全宽 $FWHM = 2350 \text{ km/s}$). 取自文献[30]中图 3.

Fig. 5 Top panel: curves depicting column densities in correspondence with variations in the ionizing continuum (using version c13.03 of Cloudy. The hydrogen column density is $N_H = 10^{20.7} \text{ cm}^{-2}$). Bottom panel: curves representing the EW of Si IV and C IV as a function of ionization parameter, assuming a Gaussian (full width at half-maximum $FWHM = 2350 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) distribution of optical depth. Taken from Fig.3 in Ref. [30].

3.2 宽吸收线吸收坑等值宽度与连续谱谱指数的关系

吸收气体中的尘埃对蓝光的散射作用强于红光, 因此尘埃的消光作用会使连续谱变得更平坦, 即谱指数 α 变小. 如果 BAL 光变是由视线上含尘埃气体在垂直于视线方向上运动(移入移出视线)引起覆盖因子的变化导致, 连续谱光度和 BAL 的等值宽度应该同样呈现反相关. 含尘埃气体移出(入)视线时, 连续谱光度增强(减弱), BAL 的等值宽度变小(变大). 这样的话, 吸收坑的等值宽度 EW 与谱指数 α 之间应该存在负相关性: 含尘埃气体移出(入)视线时, 谱指数 α 变大(变小), BAL 的等值宽度 EW 也变小(变大).

SDSS J142225.03+535901.7 的 BAL 吸收坑的 3 个速度组分及整体的等值宽度 EW 与谱指数 α 的关系如图 6 所示. 我们发现 BAL 各组分的等值宽度与谱指数之间不仅没有负相关, 甚至存在微弱的正相关. 通过分析谱指数 α 与 BAL 的等值宽度 EW 之

的相关性, 我们印证了 SDSS J142225.03+535901.7 的 BAL 光变的确是由电离连续谱的变化导致.

3.3 宽吸收线吸收坑不同速度组分及整体的等值宽度之间的关系

如果 BAL 光变是由电离连续谱的变化导致, 理论上不同速度组分的等值宽度变化应该具有一致性, 即要么一起增大要么一起减小. 图 7 展示了 BAL 吸收坑不同速度组分及整体的等值宽度之间的相关性. 我们看到在 SDSS J142225.03+535901.7 中, 仅在低速和中速以及低速和整体之间存在统计置信度较为显著 ($p < 0.05$) 的正相关性. 中速和高速之间的相关性稍弱. 导致相关性差的原因有很多, 我们主要简述以下几种.

(1) 外流的不同速度组分之间的密度、柱密度、电离度、到中心源的距离可以有很大的差异, 因此对于中心辐射的响应也可以有很大的差异. 如: (a) 各组分的密度不同, 低密度气体的复合时标长, 对中心辐射的响应不灵敏; (b) 各组分的柱密度不同, 对中心辐射的响应幅度不同; (c) 各组分的电离度不同, 对中心辐射的响应不同. 电离不足的气体对电离连续谱正响应, 过电离气体对电离连续谱负响应, 临界状态则无响应.

(2) 光变可能不完全由电离连续谱的变化导致, 覆盖因子的变化也可能在其中发挥着部分作用. 各组分的覆盖因子的变化不一样, 同样会导致 BAL 等值宽度的变化不一致.

(3) 统计置信度与观测次数有关. 若观测次数增加, 置信度可能会提高.

4 总结与展望

我们从 BAL 光变被认为是由电离连续谱变化导致的 QSO 样本中选出了一个源—SDSS J142225.03+535901.7, 该源具有 55 个历元的高信噪比光谱观测记录. 我们对其连续谱和 C IV 发射线进行了拟合, 计算了 C IV 吸收坑的 3 个速度组分及整体的等值宽度, 并分析了等值宽度 EW 与连续谱谱流量密度 f_{1700}^{con} 及谱指数 α 之间的关系. 我们发现该源的 C IV 吸收坑的各组分的等值宽度与连续谱光度之间存在显著的负相关性 ($p < 0.05$), 同时各组分的

等值宽度与连续谱谱指数之间均没有明显的负相关性. 以上两点支持该源的BAL光变是由电离连续谱的变化导致, 可以排除视线上含尘埃气体在垂直于视线方向上运动引起的覆盖因子的变化导致BAL光变这一情形. 以上结果验证了这一方法的正确性: 通过要求不同速度组分同时出现光变, 筛选出因电离连续谱变化而导致光变的源. 各组分的等值宽度与连续谱光度反相关, 这意味着光度越高C IV柱密度越低, 说明吸收气体处于过电离状态.

后续我们将对样本中其他源的BAL光变原因

进行系统分析. 未来还可以在此基础上基于电离连续谱的变化导致的光变, 使用Cloudy进行光致电离模拟, 分析复合时标 τ , 从而得到外流气体的密度、距离、能量等物理量. 此外还可以通过挑选连续谱基本不变, BAL发生剧烈变化的源, 尝试组成光变由覆盖因子的变化导致的BAL QSO样本, 并与光变由电离连续谱的变化导致的样本进行对比分析.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高.

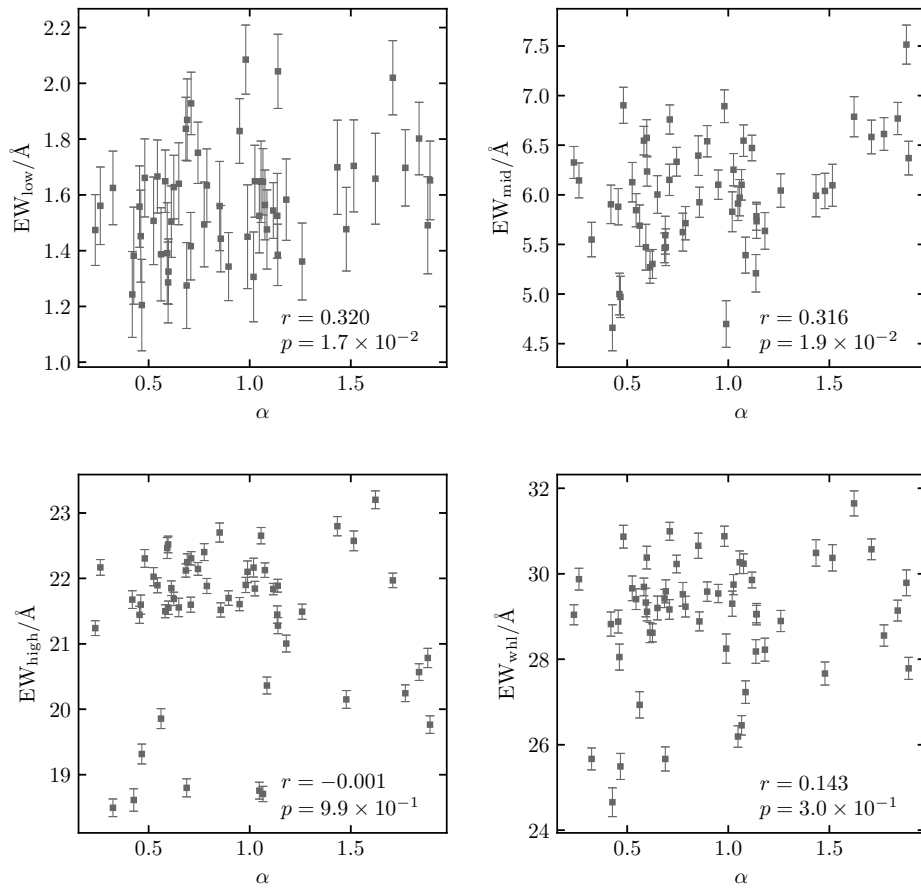


图 6 吸收坑的3个速度组分及整体的等值宽度EW与谱指数 α 之间的关系. Spearman相关系数 r 及其 p 值标注在每个子图上.

Fig. 6 The EW of 3 different velocity components of the absorption trough, as well as the whole trough, versus the spectral index α . Spearman's rank correlation coefficients and their corresponding p -values are annotated on each subplot.

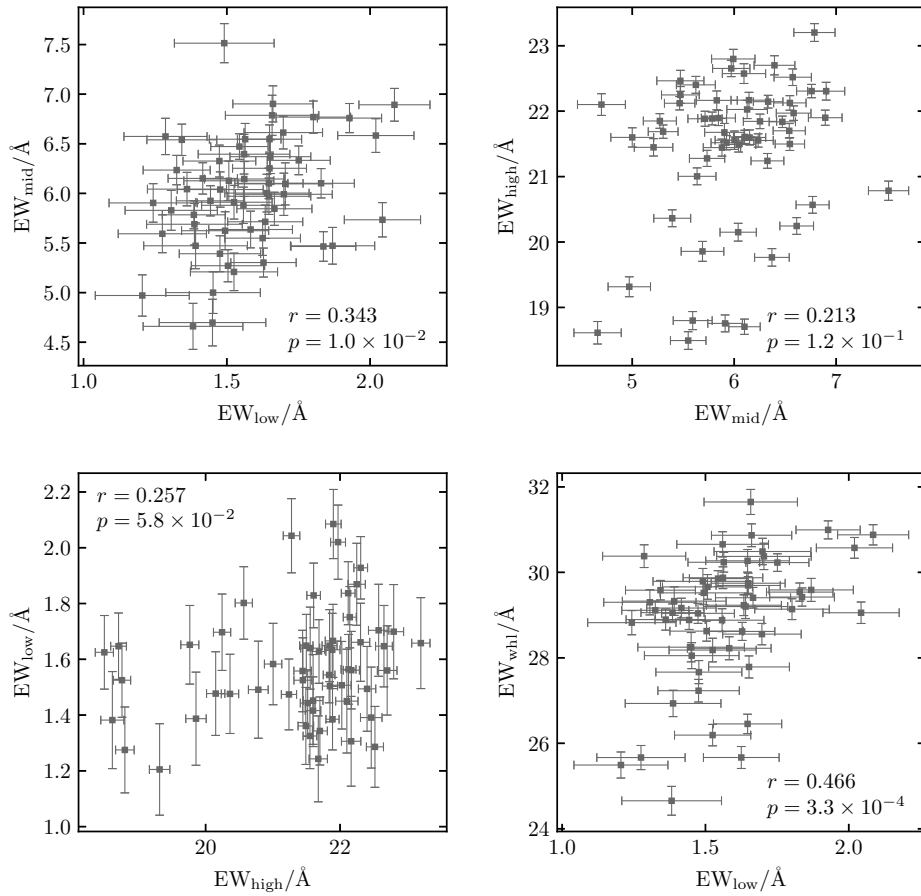


图 7 吸收坑不同速度组分及整体的等值宽度EW之间的相关性. Spearman相关系数 r 及其 p 值标注在每个子图上.

Fig. 7 The correlation between the EW of different velocity components of the absorption trough, as well as the whole trough. Spearman's rank correlation coefficients and their corresponding p -values are annotated on each subplot.

参考文献

- [1] McConnell N J, Ma C P, Gebhardt K, et al. *Nature*, 2011, 480: 215
- [2] Heckman T M, Best P N. *ARA&A*, 2014, 52: 589
- [3] Silk J, Mamon G A. *RAA*, 2012, 12: 917
- [4] Laor A, Brandt W. *ApJ*, 2002, 569: 641
- [5] Ganguly R, Brotherton M S, Cales S, et al. *ApJ*, 2007, 665: 900
- [6] Baskin A, Laor A, Hamann F. *MNRAS*, 2013, 432: 1525
- [7] Capellupo D M, Hamann F, Shields J C, et al. *MNRAS*, 2011, 413: 908
- [8] Filiz Ak N, Brandt W, Hall P, et al. *ApJ*, 2012, 775: 114
- [9] Filiz Ak N, Brandt W, Hall P, et al. *ApJ*, 2013, 777: 168
- [10] Wildy C, Goad M R, Allen J T. *MNRAS*, 2014, 437: 1976
- [11] He Z C, Bian W H, Ge X, et al. *MNRAS*, 2015, 454: 3962
- [12] Wang T G, Yang C W, Wang H Y, et al. *ApJ*, 2015, 814: 150
- [13] Rogerson J A, Hall P B, Ahmed N S, et al. *ApJ*, 2018, 862: 22
- [14] Hemler Z, Grier C, Brandt W, et al. *ApJ*, 2019, 872: 21
- [15] Lucy A B, Leighly K M, Terndrup D M, et al. *ApJ*, 2014, 783: 58
- [16] Liu G L, Zakamska N L, Greene J E, et al. *MNRAS*, 2013, 430: 2327
- [17] He Z C, Liu G L, Wang T G, et al. *ApJ*, 2017, 839: 77
- [18] Arav N, Moe M, Costantini E, et al. *ApJ*, 2008, 681: 954
- [19] Arav N, Chamberlain C, Kriss G A, et al. *A&A*, 2015, 577: A37
- [20] Moe M, Arav N, Bautista M A, et al. *ApJ*, 2009, 706: 525

- [21] Hamann F, Kanekar N, Prochaska J X, et al. MNRAS, 2011, 410: 1957
- [22] Borguet B C J, Edmonds D, Arav N, et al. ApJ, 2012, 751: 107
- [23] Hamann F, Simon L, Hidalgo P R, et al. ASPC, 2012, 460: 47
- [24] Gibson R R, Brandt W, Schneider D P, et al. ApJ, 2008, 675: 985
- [25] Shi X H, Pan X, Zhang S H, et al. ApJ, 2017, 843: L14
- [26] Stern D, Graham M J, Arav N, et al. ApJ, 2017, 839: 106
- [27] Sun L, Zhou H Y, Ji T, et al. ApJ, 2017, 819: 99
- [28] Leighly K M, Hamann F, Casebeer D A, et al. ApJ, 2009, 701: 176
- [29] Shi X H, Zhou H Y, Shu X W, et al. ApJ, 2016, 838: 88
- [30] He Z C, Wang T G, Zhou H Y, et al. ApJS, 2017, 229: 22
- [31] Stathopoulos D, Lyrtzi E, Danezis E, et al. EPJD, 2017, 71: 1
- [32] He Z C, Liu G L, Wang T G, et al. SciA, 2022, 8: e-abk3291
- [33] Shen Y, Richards G T, Strauss M A, et al. ApJS, 2011, 194: 45
- [34] Paris I, Petitjean P, Ross N P, et al. A&A, 2017, 597: A79
- [35] Hamann F, Herbst H, Paris I, et al. MNRAS, 2019, 483: 1808
- [36] Fitzpatrick E L. PASP, 1999, 111: 63
- [37] Ferland G J, Chatzikos M, Guzmán F, et al. RMxAA, 2017, 53: 385
- [38] Lu W J, Lin Y R. ApJ, 2019, 883: 30
- [39] Zhao Q Y, He Z C, Liu G L, et al. ApJ, 2021, 906: L8

Multi-epochs Spectral Variability Analysis of Broad Absorption Lines in QSO SDSS J142225.03+535901.7

HE Dong-xu HE Zhi-cheng LIU Gui-lin FANG Wen-juan SHEN Lu ZHU Dan-lei
CHEN Ya-qi DUAN Bin

(Department of Astronomy, School of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT Broad absorption lines (BALs) in quasars are among the most compelling observational evidence for the presence of outflows. BALs commonly exhibit spectral variability, and analyzing such variations helps to constrain the physical models of these outflows. Variations in the ionizing continuum incident along the line of sight from the central engine of quasars are thought to be the primary mechanism driving most BAL variability. If the BAL absorption troughs in a quasar simultaneously vary (either weakening or strengthening) at different velocities in the same direction, it is highly likely that BAL variability is primarily induced by variations in the ionizing continuum. The quasar SDSS J142225.03+535901.7, with 55 epochs of high signal-to-noise spectra, displays BAL variability. There is a significant (Spearman's correlation test, with a non-correlation probability p -value less than 0.05) anticorrelation between the equivalent widths of various velocity components of the BAL and the continuum luminosity. There is no significant anticorrelation between the equivalent widths of these components and the spectral index of the continuum, ruling out that the potential negative correlation between equivalent width and continuum luminosity is caused by the vertical motion of dusty gas along the line of sight. Therefore, it can be inferred that the BAL variability in this source is primarily driven by changes in the ionizing continuum.

Key words galaxies: active, ISM: jets and outflows, quasars: absorption lines, spectral line: profiles

附录

表 1 SDSS J142225.03+535901.7 的 55 个历元的光谱的相关信息

Table 1 The characteristics of 55 epochs spectra for SDSS J142225.03+535901.7

Plate	MJD	FiberID	S/N	α	$\sigma(\alpha)$	f_{1700}^{con}	$\sigma(f_{1700}^{\text{con}})$	μ^b	$\sigma(\mu^b)$	ζ^b	$\sigma(\zeta^b)$	A^a	$\sigma(A)^a$	EW_{low}^b	$\sigma(\text{EW}_{\text{low}}^b)$	EW_{mid}^b	$\sigma(\text{EW}_{\text{mid}}^b)$	$\text{EW}_{\text{high}}^b$	$\sigma(\text{EW}_{\text{high}}^b)$	EW_{whl}^b	$\sigma(\text{EW}_{\text{whl}}^b)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
6717	56397	828	19.2	1.88	0.02	9.1	0.3	1549	1	12	1	35	3	1.5	0.2	7.5	0.2	20.8	0.1	29.8	0.3
7031	56449	584	23.4	0.69	0.02	13.3	0.4	1547	1	15	1	60	4	1.3	0.2	5.6	0.2	18.8	0.1	25.7	0.3
7338	56660	951	25.0	1.26	0.02	12.6	0.3	1547	1	15	1	71	4	1.4	0.1	6.0	0.2	21.5	0.1	28.9	0.2
7338	56664	921	22.6	1.14	0.02	11.6	0.3	1547	1	14	1	65	4	1.5	0.2	5.2	0.2	21.4	0.1	28.2	0.3
7338	56717	873	28.3	0.90	0.02	12.5	0.2	1548	1	15	1	69	3	1.3	0.1	6.5	0.2	21.7	0.1	29.6	0.2
7338	57038	941	21.2	0.85	0.02	11.3	0.4	1546	1	16	1	71	4	1.6	0.2	6.4	0.2	22.7	0.1	30.7	0.3
7338	57050	945	23.4	1.06	0.02	11.7	0.3	1549	1	16	1	81	4	1.6	0.1	6.0	0.2	22.7	0.1	30.3	0.3
7338	57067	947	20.7	1.62	0.02	9.6	0.3	1546	1	18	2	66	4	1.7	0.2	6.8	0.2	23.2	0.1	31.6	0.3
7338	57127	965	19.7	1.43	0.02	9.9	0.3	1548	1	12	1	57	3	1.7	0.2	6.0	0.2	22.8	0.1	30.5	0.3
7338	57135	965	20.2	1.51	0.02	9.8	0.3	1546	1	13	1	53	3	1.7	0.2	6.1	0.2	22.6	0.2	30.4	0.3
7338	57843	945	23.4	1.18	0.02	11.4	0.3	1545	1	14	1	58	4	1.6	0.1	5.6	0.2	21.0	0.1	28.2	0.3
7338	57874	945	24.1	1.09	0.02	11.6	0.3	1544	1	14	1	66	4	1.5	0.1	5.4	0.2	20.4	0.1	27.2	0.3
7338	58127	943	28.7	1.07	0.02	12.9	0.2	1544	1	14	1	68	4	1.6	0.1	6.1	0.2	18.7	0.1	26.5	0.2
7338	58174	945	25.7	1.05	0.02	13.2	0.3	1543	1	14	1	67	4	1.5	0.1	5.9	0.2	18.8	0.1	26.2	0.3
7339	56683	949	29.1	0.86	0.02	13.6	0.3	1547	1	16	1	83	4	1.4	0.1	5.9	0.2	21.5	0.1	28.9	0.2
7339	56697	945	30.3	0.60	0.01	13.1	0.2	1548	1	16	1	74	3	1.3	0.1	6.2	0.1	21.6	0.1	29.1	0.2
7339	56715	945	30.9	0.62	0.01	13.4	0.2	1547	1	13	1	71	3	1.6	0.1	5.3	0.1	21.7	0.1	28.6	0.2
7339	56720	947	26.1	1.03	0.01	11.0	0.2	1548	1	16	1	68	3	1.6	0.1	6.3	0.2	21.8	0.1	29.7	0.2
7339	56722	941	24.5	1.71	0.01	8.1	0.1	1548	1	12	1	37	3	2.0	0.1	6.6	0.2	22.0	0.1	30.6	0.2
7339	56739	947	28.7	0.71	0.01	12.0	0.2	1547	1	15	1	73	3	1.4	0.1	6.2	0.2	21.6	0.1	29.2	0.2
7339	56747	945	27.9	0.24	0.02	14.4	0.3	1547	1	13	1	68	3	1.5	0.1	6.3	0.2	21.2	0.1	29.0	0.2
7339	56749	945	31.4	0.58	0.01	13.9	0.2	1548	1	16	1	88	4	1.6	0.1	6.5	0.1	21.5	0.1	29.7	0.2
7339	56755	949	25.4	1.14	0.02	11.0	0.2	1543	1	16	1	77	4	2.0	0.1	5.7	0.2	21.3	0.1	29.1	0.3
7339	56782	943	34.0	1.12	0.01	12.1	0.2	1546	1	15	1	68	3	1.5	0.1	6.5	0.1	21.8	0.1	29.9	0.2
7339	56783	943	31.0	1.14	0.01	11.9	0.2	1547	1	15	1	63	3	1.4	0.1	5.8	0.1	21.9	0.1	29.1	0.2
7339	56804	957	27.0	1.08	0.02	12.3	0.3	1547	1	15	1	69	3	1.6	0.1	6.5	0.2	22.1	0.1	30.2	0.2
7339	56808	951	26.4	0.79	0.01	11.1	0.2	1549	1	16	1	60	4	1.6	0.1	5.7	0.2	21.9	0.1	29.2	0.2
7339	56813	951	27.4	0.98	0.01	9.4	0.2	1545	1	18	2	66	5	2.1	0.1	6.9	0.2	21.9	0.1	30.9	0.2

表 1 续
Table 1 Continued

Plate	MJD	FiberID	S/N	α	$\sigma(\alpha)$	f_{1700}^{con}	$\sigma(f_{1700}^{\text{con}})$	μ^b	$\sigma(\mu)^b$	ζ^b	$\sigma(\zeta)^b$	A^a	$\sigma(A)^a$	EW_{low}^b	$\sigma(\text{EW}_{\text{low}})^b$	EW_{mid}^b	$\sigma(\text{EW}_{\text{mid}})^b$	$\text{EW}_{\text{high}}^b$	$\sigma(\text{EW}_{\text{high}})^b$	EW_{whl}^b	$\sigma(\text{EW}_{\text{whl}})^b$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
7339	57082	945	22.6	0.78	0.02	12.6	0.4	1547	1	15	1	77	4	1.5	0.2	5.6	0.2	22.4	0.1	29.5	0.3
7339	57428	949	18.2	0.99	0.03	11.1	0.5	1544	1	13	1	65	4	1.4	0.2	4.7	0.2	22.1	0.2	28.2	0.3
7339	57435	943	21.4	1.02	0.02	12.2	0.4	1545	1	13	1	59	4	1.3	0.2	5.8	0.2	22.2	0.1	29.3	0.3
7339	57451	943	23.3	0.69	0.02	12.3	0.3	1544	1	15	1	77	4	1.9	0.1	5.5	0.2	22.2	0.1	29.6	0.3
7339	57463	947	22.8	0.42	0.02	13.3	0.4	1545	1	13	1	67	4	1.2	0.2	5.9	0.2	21.7	0.1	28.8	0.3
7339	57481	941	23.9	0.46	0.02	13.8	0.4	1546	1	13	1	73	4	1.6	0.1	5.9	0.2	21.4	0.1	28.9	0.3
7339	57492	943	22.2	0.52	0.02	13.0	0.4	1544	1	14	1	64	4	1.5	0.2	6.1	0.2	22.0	0.1	29.7	0.3
7339	57510	943	26.8	0.61	0.02	13.4	0.3	1547	1	15	1	75	4	1.5	0.1	5.3	0.2	21.9	0.1	28.6	0.2
7339	57518	941	26.4	0.54	0.02	13.0	0.3	1546	1	13	1	64	3	1.7	0.1	5.8	0.2	21.9	0.1	29.4	0.2
7339	57544	941	23.2	0.65	0.02	12.1	0.3	1549	1	14	1	67	4	1.6	0.1	6.0	0.2	21.6	0.1	29.2	0.3
7339	57892	949	21.2	0.47	0.03	13.9	0.5	1544	1	13	1	60	4	1.2	0.2	5.0	0.2	19.3	0.2	25.5	0.3
7339	57901	949	20.9	0.56	0.03	13.5	0.5	1542	1	13	1	52	4	1.4	0.2	5.7	0.2	19.9	0.2	26.9	0.3
7339	57918	949	18.9	0.43	0.04	13.4	0.6	1548	1	15	1	69	5	1.4	0.2	4.7	0.2	18.6	0.2	24.7	0.3
7339	57934	949	26.7	0.32	0.02	13.8	0.3	1543	1	15	1	67	4	1.6	0.1	5.5	0.2	18.5	0.1	25.7	0.3
7340	56726	951	29.6	0.95	0.01	11.4	0.2	1547	1	18	2	73	5	1.8	0.1	6.1	0.1	21.6	0.1	29.5	0.2
7340	56829	945	31.3	0.71	0.01	11.7	0.2	1546	1	15	1	68	3	1.9	0.1	6.8	0.1	22.3	0.1	31.0	0.2
7340	56833	945	30.9	0.68	0.01	11.5	0.2	1547	1	17	1	70	4	1.8	0.1	5.5	0.1	22.1	0.1	29.4	0.2
7340	56837	945	32.4	0.74	0.01	10.8	0.1	1547	1	16	1	70	3	1.8	0.1	6.3	0.1	22.1	0.1	30.2	0.2
7340	57106	947	25.1	0.26	0.02	13.2	0.3	1547	1	15	1	81	4	1.6	0.1	6.1	0.2	22.2	0.1	29.9	0.3
7340	57185	943	24.4	0.60	0.02	13.5	0.4	1547	1	15	1	74	4	1.3	0.1	6.6	0.2	22.5	0.1	30.4	0.3
7340	57196	943	25.0	0.48	0.02	12.6	0.3	1546	1	16	1	81	4	1.7	0.1	6.9	0.2	22.3	0.1	30.9	0.3
7340	57570	945	20.7	0.46	0.03	12.4	0.5	1548	1	15	1	73	4	1.5	0.2	5.0	0.2	21.6	0.1	28.1	0.3
7340	57576	945	19.0	0.59	0.03	12.0	0.5	1545	1	14	1	63	4	1.4	0.2	5.5	0.2	22.5	0.2	29.3	0.3
7340	58216	947	25.0	1.77	0.02	10.8	0.3	1547	1	13	1	56	3	1.7	0.1	6.6	0.2	20.2	0.1	28.6	0.2
7340	58230	949	24.6	1.89	0.02	11.5	0.3	1547	1	13	1	66	4	1.7	0.1	6.4	0.2	19.8	0.1	27.8	0.3
7340	58258	945	23.3	1.48	0.02	12.3	0.4	1548	1	15	1	60	4	1.5	0.1	6.0	0.2	20.1	0.1	27.7	0.3
7340	58289	949	26.1	1.84	0.01	9.4	0.2	1548	1	14	1	49	3	1.8	0.1	6.8	0.2	20.6	0.1	29.1	0.2

^a The unit is $10^{-17} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{\AA}^{-1}$ ^b The unit is \AA